

초퍼제어 - 직류전동기의 PSPICE 컴퓨터 시뮬레이션

원충연*, 김덕헌*, 유홍제*, 유동욱**

* 성균관 대학교 전기공학과 ** 한국전기연구소

Pspice Computer Simulation of Chopper Controlled DC Motor

Won Chung-Yuen*, Kim Duk-Heon*, Yoo Hong-Je*, Yoo Dong-Wook**

* Dept. of Electrical Eng., Sung Kyun Kwan Univ.

** Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

In this paper, the authors describe the equivalent circuit for a DC motor in consideration of both magnetic saturation and armature reaction phenomena. To develop DC motor model in PSPICE is to eliminate the gap between drive electronics and models of driven machine. On the basis of these results the dynamic characteristics of a MOSFET chopper controlled DC series motor are investigated by PSPICE simulation and experiment.

1. 서론

서버 제어와 견인력을 요하는 산업계 응용면에서 직류 전동기는 제어가 쉽기 때문에 많이 사용되고 있다. 이와같이 직류전동기는 전기자 혹은 계자회로 중에 하나를 전력 변환기에 의해 제어한다. 즉, 초퍼제어 직류 전동기 구동은 $0 < \alpha < 1$ 범위의 duty ratio와 적절한 동작 주파수로 이루어진다.

직류 전동기 전기자에 대한 컴퓨터 모델은 일정저항 및 인덕터 + 계자전류와 회전자 속도에 비례하는 역기전력으로 고려된다. 실제 전동기 구동시스템의 정적 및 동적관계를 조사하려면 이러한 간단한 모델은 자기포화 및 계자 - 전기자 반작용과 같은 현상을 무시하기 때문에 적당하지 않다. 보통 전동기 계자부분은 포화영역 부근에서 동작하고, 과부하 토오크가 필요할 때 동작점에서 포화영역으로 이동된다. 지금까지 구동시스템 시뮬레이션과 해석에 대한 직류 전동기 모델이 몇가지 제안되었지만, 이것들은 복잡한 미분방정

식을 풀거나 라플라스 변환에 의존한 것이다. 이러한 접근 방법의 불편은 수학적인 모델이 전력변환기의 모델과 쉽게 연결할 수 없다는 점이다.[1]

전력전자 분야에서 SPICE의 적용해석은 모델링과 계산시간의 제한에도 불구하고 활발하게 연구되어 왔는데, 주로 POWER MOSFET, SCR, GTO 등의 능동 스위치 소자에 대한 특성 해석과 전력변환장치의 모델링에 의한 단편적인 해석에 응용되었다.[2]-[4] SPICE에서 직류전동기 모델을 개발하기 위하여는 완전한 컨버터 - 전동기 구동시스템 설계작업이 좀더 직접적이고 실제적이어야 한다. 또한 복잡한 수학적 동작의 사용을 피하고 특수한 가정이 없어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 SPICE를 사용한 직류전동기 시뮬레이션을 하기 위하여 Level 0 ~ Level 2 까지의 컴퓨터 모델을 제시 한다. 이러한 모델에는 전동기 자기포화, 전기자 반작용 등이 고려된다.[5]-[6]

2. 직류전동기 PSPICE 모델

2-1. Level 0 모델

이상적인 직류전동기에 대한 기본 방정식은 아래와 같다.

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k_{air} \omega_m \quad (1)$$

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + f\omega_m + T_L = k_{air} i_a \quad (3)$$

여기서, V_a, V_f : 전기자 및 계자 단자전압
 R_a, R_f : 전기자 및 계자 저항
 T_L : 부하 토오크
 ω_m : 전동기 각속도

f : 마찰계수
 J : 관성계수
 k_m : EMF 상수

위의 같은 기본 방정식을 PSPICE에 의해 모델링 하면 그림 1과 같다. 이와같은 모델은 모든 비선형 특성을 무시하였지만, 경부하 운전시 어느정도의 정확성은 보장할 수 있다.

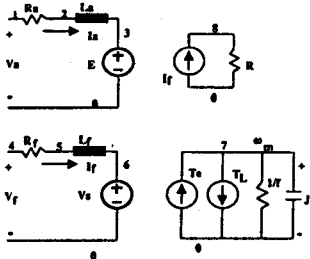


그림 1. 직류 전동기 PSPICE 모델 Level 0

2 - 2. Level 1 모델

경부하 운전시에는 Level 0에서 가정하였던 것과는 다르게 자기회로가 비선형적인 특성을 보이므로 자기포화 현상을 고려하여 Level 1 모델을 다음과 같이 2가지 접근방법으로 시뮬레이션이 가능 하도록 한다.

접근방법 1

무부하 상태에서의 계자권선의 여자전류와 역기전력 전압의 관계를 나타낸 곡선은 그림 2와 같다. 이러한 직류전동기의 자기포화 곡선은 두개의 상이한 기울기를 가지는 직선에 의하여 구간별로 나누어 선형화 할 수 있다.

$$\Delta E = 0 \quad (if \leq ifs \text{ 일때})$$

$$\frac{\Delta E_2}{\Delta if_1} = \frac{\Delta E_2}{\Delta if_2} = R_{eff} \quad (if > ifs \text{ 일때})$$

PSPICE에서 이러한 방정식을 구현하려면 스위칭 회로는 선형영역에서 포화영역으로 또는 그 반대로 전동기의 성능 곡선이 스위칭할 수 있는 것이 요구된다. PSPICE로 이러한 현상을 표현할 수 있는 스위칭 회로는 그림 3에 보여진다. ΔE 는 계자권선에서의 포화상태로 인하여 역기전력 전압의 감소를 나타내며 R_{eff} 양단의 전압강하에 비례한다. 이 회로에서 $if \leq ifs$ 일때 다이오드 D_2 는 역바이어스가 되어 $\Delta E = 0$ 가 되고, $if > ifs$ 일때 D_2 는 순바이어스가 되어 $\Delta E \propto \Delta if$ 가 된다.

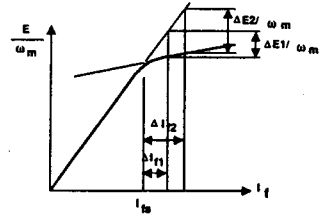


그림 2. 직류 전동기의 자기포화 곡선

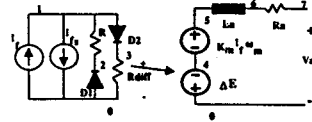


그림 3. PSPICE 가능한 스위칭 회로

접근방법 2

수학적인 관점에서 전동기 역기전력 전압과 계자전류와의 관계를 나타내면 식(5)와 같이 표시할 수 있다. [1]

$$E = C_1 \cdot \tanh(C_2 \cdot if) + C_3 \cdot if + C_4 \quad (5)$$

PSPICE에서는 tanh함수를 지원하지 못하므로 적절한 소자 파라미터를 가진 역바이어스된 다이오드의 특성과 관련된 지수함수를 사용하여 근사화 할 수 있다.

그림 4는 이러한 두 함수 사이의 유사성을 보여준다. PSPICE에서의 다이오드 특성은 비선형 전류원 I_d 에 의하여 모델된다. 다이오드에 역방향으로 흐르는 전류 I_D 는 식(6)에 의해 표시된다.

$$-I_D = I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V_d}{nV_t}\right) \right] - 1 \quad (6)$$

여기서, $V_t = kT/q$ (실온에서 28.85mV)

T : 절대온도

q : 전하량

V_d : 다이오드 순방향 바이어스 전압

I_d : 다이오드에 흐르는 순방향 전류

만약 소자의 파라미터 값 $n = 27$, $I_s = 1.0$ 이라고 설정한다면, 식(6)은 아래의 식(7)과 같이 된다.

$$I_D = 1 - \exp(1.432 \cdot V_d) \quad (7)$$

전동기의 자기포화 곡선은 그림 5의 회로로 모델화 되는데 V_s 는 I_D 에 대한 전류센서 이다.

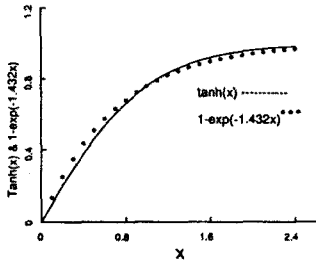


그림 4. tanh(x)와 1-exp(-1.432x)사이의 곡선유사성

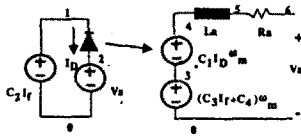


그림 5. 포화부분만 고려한 직류 전동기 모델 Level 1

2 - 3. Level 2 모델

전동기에 정격전류가 인가되면 전기자 반작용 효과는 매우 중요한 부분을 차지하게 된다. 이러한 효과를 시뮬레이션 하기 위하여 두가지 방법으로 접근하여 보았다.

접근방법 1

전기자 전류 I_a 값의 변화에 따른 역기전력 전압과 계자전류의 관계는 그림 6에 보여진다. 관계곡선은 I_a 의 증가와 함께 자속에 있어서 실제적인 감소를 보여준다. 전기자 반작용에 의한 전압강하 효과는 그림 7에서 계자전류 I_f 와 전기자 전류 I_a 에 의해 제어된 증속전압인 E_{AR} 를 이용하여 모델링 한다. 여기에서

$$E_{AR} = C_3 I_a + C_4 I_f \quad (8)$$

E_{ab} 는 전기자 반작용 효과가 발생하기 시작하는 시점의 전압을 나타내며 E_{LM} 과 D_2 는 전기자 전류가 무한정으로 증가하지 못하도록 전기자 반작용에 의한 전압강하를 제한하는 역할을 한다.

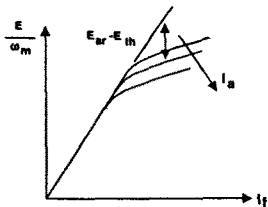


그림 6. 직류 전동기 전기자 반작용 영향

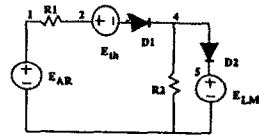


그림 7. 전기자 반작용 전압강하를 고려한 모델

접근방법 2

계자에서의 자기포화 현상과 전기자 반작용 영향을 모두 고려하여 결합하기 위하여 전동기의 자기회로는 고정자 극의 비동차 포화(non-homogeneous saturation)에 의존한다. 실제적인 전동기 계자권선에서의 여자자속(전류)는 전기자 반작용을 고려할 때 아래의 방정식에서 얻어진다.

$$k_m \Phi_{eff} = \frac{N_f}{2F_a} \left[\frac{I_f + F_a/N_f}{I_f - F_a/N_f} (C_1 \cdot \tanh(C_2 \cdot I) + C_3 \cdot I + C_4) \right] I \quad (9)$$

$$F_a = \frac{I_a Z_b p}{2a \pi D}$$

여기서, a : 전기자 전류 경로의 수

b_p : 극 슈우 폭

D : 전기자 직경

F_a : 전동기 부하에 따른 전기자 MMF

N_f : 계자권선의 턴수

Z : 전기자 권선의 도체수

계자전류의 범위가 $I_f - F_a/N_f$ 에서 I_f 까지는 전기자 반작용이 철심을 포화시킬 정도로 강력하지 못하므로 선형적인 함수로 가정할 수 있다. 그러므로 이 범위내에서의 계자전류의 평균치는 식(11)과 같다.

$$I_{f\text{eff}1} = I_f - F_a/2N_f \quad (11)$$

계자전류가 $I_f + F_a/N_f$ 에서 I_f 까지는 전기자 반작용이 철심을 포화시킬 수 있을 뿐만아니라 전기자 반작용에 의한 비자화 효과는 극 슈우에 따라서 가변된다. 만약 이 영역을 각각에 대하여 선형적인 n개의 부분으로 나누게 된다면 평균 자속은 아래의 식(12)로 나타낼 수 있다.

$$k_m \Phi_{eff2} = \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^n C_1 \cdot \tanh \left[C_2 \cdot \left(I_f + \frac{(k-1) F_a}{n N_f} \right) \right] + \tanh \left[C_2 \cdot \left(I_f + \frac{k F_a}{n N_f} \right) \right] + C_3 \cdot \left[2 I_f + \frac{(2k-1) F_a}{n N_f} \right] + 2 \cdot C_4 \quad (12)$$

$$k_m \Phi_{eff} = (k_m \Phi(I_{eff1}) + k_m \Phi_{eff2})/2. \quad (13)$$

대부분의 전동기에서 n값을 3 이하로 설정해주면 완벽한 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있다. 식(11) - (13)을 PSPICE 등가회로로 나타내면 그림 8과 같다.

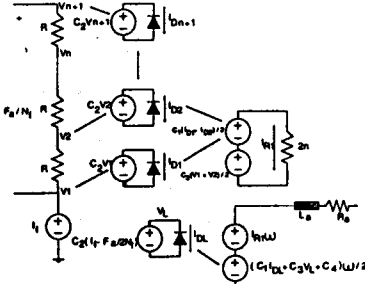


그림 8. 직류 전동기 Level 2 (자기포화 및 전기자 반작용 고려)

3. 전동기 시뮬레이션 결과 및 고찰

앞에서 언급한 전동기 모델을 이용하여 직류 직권 전동기 - 초퍼 구동시스템을 PSPICE를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 전체적인 구동시스템은 그림 9에 나타내었다.

전동기 모델링에 있어서는 두가지의 모델을 선정하여 시뮬레이션 하였는데 모델 1은 280W급의 직류 직권 전동기로서 계자권선에 자기포화 현상 및 전기자 반작용 현상까지 고려된 시뮬레이션만을 행하였으며, 모델 2는 2.2KW급 직류 직권 전동기를 이용하여 무부하 경우의 시뮬레이션 및 실험에 의하여 그 결과를 비교하였다. [7] 여기에서 사용된 MOSFET는 N채널형의 IRF-250을 사용하였다. 모델 1을 이용한 시뮬레이션에서 사용된 PSPICE 등가회로는 그림 15와 같다.

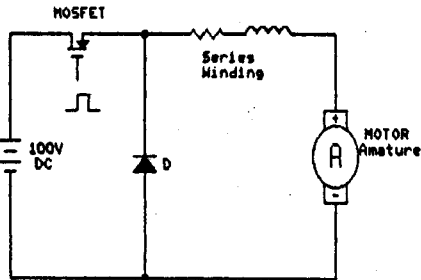


그림 9. MOSFET 초퍼구동 직류 전동기 시스템

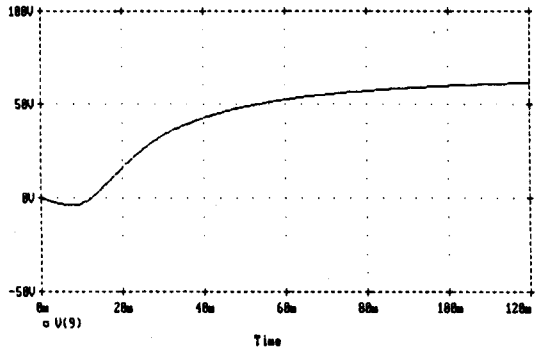


그림 10. (모델 1) 전동기 속도파형

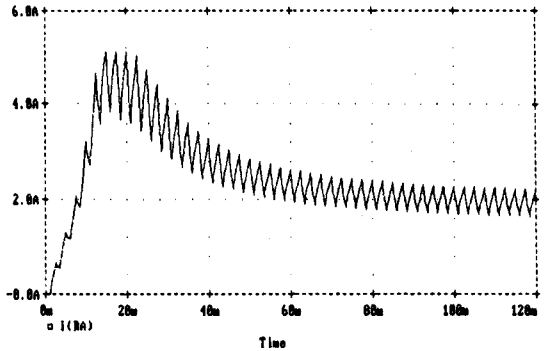


그림 11. (모델 1) 전동기의 전기자 전류파형

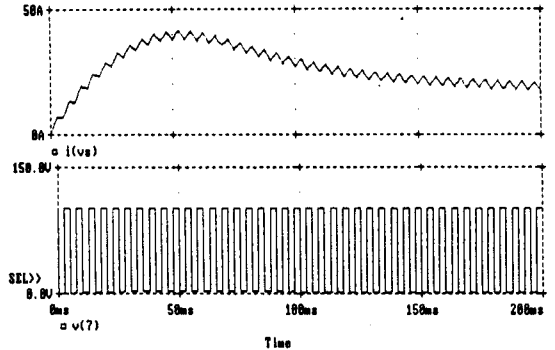


그림 12. (모델 2) 전동기 전기자 전류 시뮬레이션 파형(상) FET의 Drain-Source 전압 시뮬레이션 파형(하)

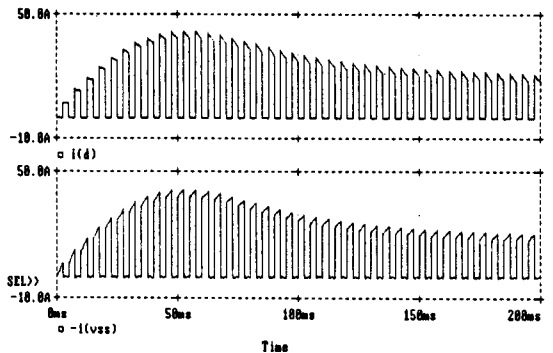


그림 13. (모델 2) 환류 다이오드 전류 시뮬레이션 파형(상) 권선 전류 시뮬레이션 파형(하)

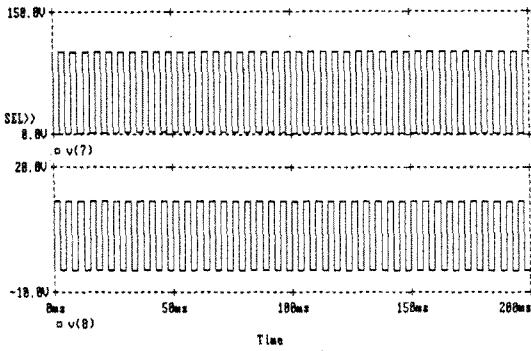


그림 14. (모델 2)
FET의 Drain-Source 전압 시뮬레이션 파형(상)
FET의 게이트 펄스 시뮬레이션 파형(하)

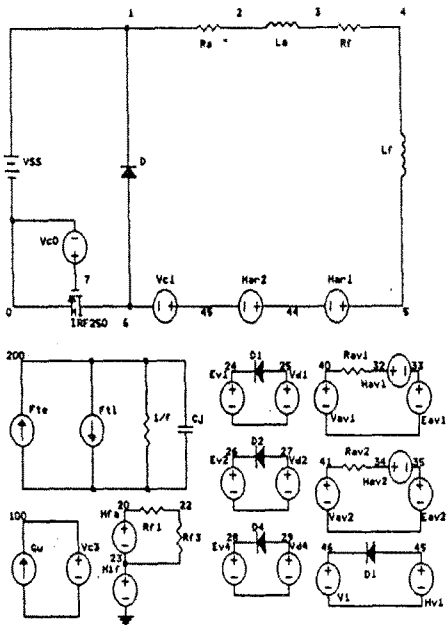


그림 15. 전동기 - 초퍼 구동시스템의 PSPICE 동가회로

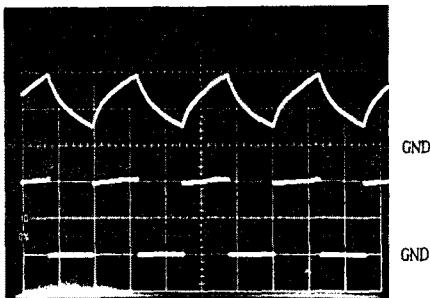


그림 16. 전동기 전기자 전류 실험 파형(상)
(2ms/div , 10V/div)
FET의 Drain-Source 전압 실험 파형(하)
(2ms/div , 50V/div)

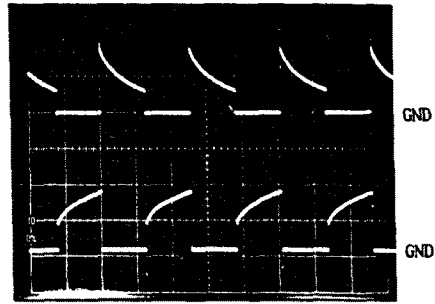


그림 17. 환류 다이오드 전류 실험 파형(상)
(2ms/div , 10V/div)
전원 전류 실험 파형(하)
(2ms/div , 10V/div)

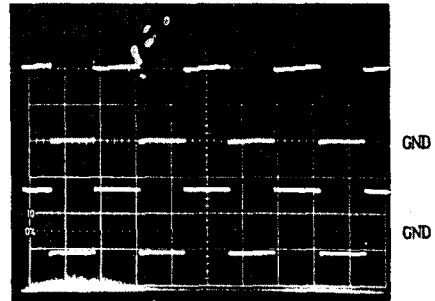


그림 18. FET의 Drain-Source 전압 실험 파형(상)
(2ms/div , 50V/div)
FET의 게이트 펄스 실험 파형(하)
(2ms/div , 10V/div)

4. 결론

본 연구에서는 산업용 분야에서 많이 사용되는 전력 변환기 - 직류 전동기 구동 시스템에 대하여 PSPICE 컴퓨터 모델을 제시하였다. 이와같은 모델을 세우기 위해서는 전동기 계자회로의 자기포화현상 및 전기자 반작용 현상을 고려하여야 한다. 그 결과로서 간단하게 직류 전동기를 포함한 전력 변환기 구동시스템의 정적 및 동적 특성의 시뮬레이션이 가능함을 알 수 있었다. 향후 전기자 및 계자 권선회로 파라미터의 전류 의존성과 와전류 표유효과등을 추가적으로 고려함으로써 거의 실제에 가까운 시뮬레이션을 하고자 할 예정이다. 또한, 4상한 초퍼제어 - 직류 전동기 시뮬레이션 및 해석이 이루어지게 되면 서어보제어 및 전인력을 요구하는 산업계에서 응용이 예상된다.

부 록

시뮬레이션된 직류 직권 전동기의 각 파라미터 값은 다음과 같다.

모델 1.

200[V], 1.4[A], 1200[RPM], $R_a=16.105[\Omega]$, $L_a=0.4549[H]$
 $R_b=4.399[\Omega]$, $L_b=0.0423[H]$, $B=0.00083[N \cdot m \cdot sec/rad]$
 $J=0.00286[N \cdot m \cdot sec^2/rad]$, $K_m=0.66$

모델 2.

110[V], 28[A], 1800[RPM], $R_a=0.247[\Omega]$, $L_a=5.353[mH]$
 $R_b=0.350[\Omega]$, $L_b=30.179[mH]$, $B=0.01412[N \cdot m \cdot sec/rad]$
 $J=0.0797[N \cdot m \cdot sec^2/rad]$, $K_m=0.033$

참고 문헌

1. V. Blasko, "A model of chopper controlled DC Series motor", IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. IA-21, No.1, pp.207-217, Jan./Feb. 1985.
2. "PSPICE", MicroSim Coporation (January 1986)
3. Muhammad H, Rashid, "PSPICE for Circuit and Electronics Using Pspice", Prentice-Hall Company, 1990.
4. 원종연, 양승호, 김세찬, 김덕헌, "SCR 및 TRIAC PSPICE 모델에 관한 연구", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.357-361, 1990.
5. Y. C. Liang and V. J. Gosbrill, "Realistic Computer Model of DC Machine for CADA Topology on SPICE2", in IEEE PESC Conf., Proc., pp.765-771, Apr. 1988.
6. Yung - Chil Liang, "DC Machine Models for SPICE2 Simulation", IEEE Trans. on PE-5, No. 1, pp.16-19, Jan. 1990
7. 홍순찬, "마이크로 프로세서에 의한 직류 전동기의 고효율 운전", 공학박사 학위논문, 서울대학교, 1985.